

**SOLDADURA DE RECARGUE PARA REPARACIÓN DE ESPESORES
DELGADOS EN MOLDES DE TERMOFORMADO EN DURALUMINIO CON
PROCESO GTAW.**

**IVAN ALONSO CHAVEZ LEON
C.C. N° 1.032.388.997**

**UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE POSGRADOS
ESPECIALIZACION EN SOLDADURA
BOGOTA D.C., DICIEMBRE DE 2014**

**SOLDADURA DE RECARGUE PARA REPARACIÓN DE ESPESORES
DELGADOS EN MOLDES DE TERMOFORMADO EN DURALUMINIO CON
PROCESO GTAW.**

**IVAN ALONSO CHAVEZ LEON
C.C. N° 1.032.388.997**

**Proyecto de grado para optar al título de
ESPECIALISTA DE SOLDADURA**

**ASESOR
ING. MVICTOR ELBERTO RUIZ ROSAS**

**UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE POSGRADOS
ESPECIALIZACION DE SONDADURA
BOGOTA D.C., DICIEMBRE DE 2014**

Bogotá, Noviembre 4 de 2014

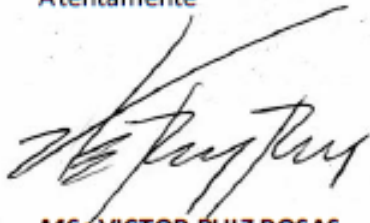
Señores
INSTITUTO DE PROGRADOS
ESPECIALIZACIÓN EN SOLDADURA
CIUDAD

Asunto: Aprobación Proyecto de grado para jurados

Cordial saludo

Después de realizada la revisión del proyecto de grado titulado SOLDADURA DE RECARGUE PARA REPARACIÓN DE ESPESORES DELGADOS EN MOLDES DE TERMOFORMADO EN DURALUMINIO CON PROCESO GTAW del estudiante de Especialización en Soldadura IVAN ALONSO CHAVEZ LEON, considero que está listo para ser evaluado por jurados.

Atentamente

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Victor Ruiz Rosas', is written over a faint, circular official stamp.

MSc VICTOR RUIZ ROSAS

Tutor

TEXTO DE AGRADECIMIENTOS

“Es necesario aprender lo que necesitamos y no únicamente lo que queremos”
Paulo Coelho.

En principio, sin objeción, al Dios de la vida que nos ha permitido caminar nuestra propia senda acompañándonos en cada momento de angustia o soledad para fortalecer nuestro camino hasta el final.

A mis padres, que me acompañaron con sus palabras, motivaciones, uno que otro llamado de atención y todo su amor, para que mi formación personal y profesional avanzara sin parar.

A mi universidad que llevamos en el corazón y en nuestra mente como una impronta, como un sello imborrable que me hace sentir orgulloso y que llevaremos por siempre a través de todas las acciones que con calidad emprendamos en nuestra vida profesional.

Agradecimiento a la empresa Metalmecánica Santa Bárbara Ltda., quien me apoyo económica y conceptualmente para que juntos culmináramos con éxito este proyecto.

A La empresa Ajoever S.A. que creyó en mi compromiso y dedicación para resolver el problema que los aquejaba.

Finalmente, a toda mi familia que siempre estuvo acompañándome, de manera silenciosa, mi proceso académico, animando mis avances en cada semestre para no desfallecer a pesar de las dificultades.

A todos ellos, muchas gracias.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	11
2. ANTECEDENTES	12
3. DESCRIPCION Y FORMULACION DEL PROBLEMA	15
4. JUSTIFICACIÓN	16
5. OBJETIVOS	17
5.1 OBJETIVO GENERAL	17
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
6. MARCOS REFERENCIALES	18
6.1 MARCO TEORICO	18
6.1.1 Aluminio	18
6.1.1.1 Criterios de designación	18
6.1.1.2 Elementos de aleación	18

6.1.1.3 Sistema de designación CEM	19
6.1.1.4 Designaciones de templado	21
6.1.2 Proceso de soldeo TIG (GTAW)	23
6.1.2.1 Descripción y denominaciones	23
6.1.2.2 Ventajas y limitaciones	24
6.1.2.3 Aplicaciones	25
6.1.2.4 Selección del tipo de corriente	25
6.1.2.5 Equipo de soldeo	26
6.1.2.6 Funciones	28
 7. ALCANCE Y DELIMITACIÓN	 30
 8. METODOLOGÍA	 31
 8.1 TECNICAS E INSTRUMENTOS	 31
8.1.1 Composición química	31
8.1.2 Dureza	31
8.1.3 Metalografía	31
8.1.4 Fabricación de Probetas	31
8.1.5 Especificación del procedimiento de soldadura	32
 8.2 FASES DE LA INVESTIGACIÓN	 32
8.2.1 Caracterización del aluminio	33
8.2.2 Fabricación de probetas	33
8.2.3 Pruebas de soldadura	36
8.2.4 Generación de la especificación del procedimiento de soldadura (WPS)	38

9. RESULTADOS	39
9.1 CARACTERIZACION DEL ALUMINIO	39
9.1.1 Composición química	39
9.1.2 Tratamiento térmico	40
9.1.3 Conformado del material	41
9.2 PRUEBAS DE SOLDADURA	44
9.3 GENERACION DE LA ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA WPS	45
CONCLUSIONES	49
BIBLIOGRAFIA	50

LISTA DE TABLAS

		pág.
Tabla 1.	Resultados de las prueba de espectrometría de emisión óptica	39
Tabla 2.	Comparación de resultados con la norma del aluminio	40
Tabla 3.	Resultados de las pruebas de dureza	41
Tabla 4.	Parámetros de las pruebas de soldadura	44
Tabla 5.	Variables del procedimiento de soldadura	46

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Descripción del proceso GTAW	23
Figura 2. Características del soldeo de acuerdo a la corriente seleccionada	26
Figura 3. Características de la onda cuadrada para corriente alterna	28
Figura 4. Plano de las probetas	34
Figura 5. Plano del molde, sección de reparación	34
Figura 6. Plano de la herramienta de forma	35
Figura 7. Formato de registros del procedimiento para calificación (PQR)	37
Figura 8. Imagen de la muestra usada para todas las pruebas de laboratorio	42
Figura 9. Muestra del bloque de aluminio en la dirección L1 a 200x	42
Figura 10. Muestra del bloque de aluminio en la dirección L2 a 200x	43
Figura 11. Muestra del bloque de aluminio en la dirección T a 200x	43
Figura 12. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)	47

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Resultados de laboratorio Universidad Nacional de Colombia

ANEXO B. PQR de las pruebas de soldadura

ANEXO C. Certificado de calidad aluminio para pruebas de soldadura

ANEXO D. Norma del aluminio para composición química

INTRODUCCIÓN

Este proyecto se inició por petición de la compañía Ajover S.A. a su principal contratista de mecanizado y mantenimiento Metalmecánica Santa Bárbara Ltda. Esta petición fue, la reparación de cierta cantidad de moldes en aleación de aluminio para la producción de los productos sello plus, uno de estos moldes se suministró por parte de su dueño al contratista de forma no devolutiva, para ser usado en pruebas para este proyecto.

Como no se conocía la especificación del aluminio en la cual estaban fabricados estos moldes, se comenzó realizando una caracterización del material, para ello se envió una muestra del molde al Laboratorio de Materiales y Procesos en la Universidad Nacional de Colombia en la sede Bogotá D.C. Para esta caracterización se realizaron tres ensayos, el de espectrometría de emisión óptica, el de dureza, y el de metalografía, cada uno de estos ensayos para conocer la composición química, el tratamiento térmico y el conformado del material respectivamente.

Una vez se distinguió que la aleación era un aluminio AA 6061-T6, se consultó en el mercado nacional que proveedor podría suministrar de este aluminio con certificado de calidad, y luego, con ayuda de la Sección IX del Código ASME y la indagación en el mercado nacional, se encontró que el aporte en varilla en aluminio para proceso GTAW indicado para aplicar al molde era el AWS ER 4043.

Una vez adquiridos estos materiales, se procedió a fabricar en centro de mecanizado las probetas para realizar las pruebas de soldadura.

Por último, y luego de registrar y analizar todas las pruebas de soldadura, se procedió a generar un formato de especificación de soldadura, tomando como modelo el presentado en el Apéndice B de la Sección IX del Código ASME, consignado en este formato los parámetros de metal base, material de aporte, precalentamiento, forma, características eléctricas y técnica para la correcta reparación de estos moldes.

2. ANTECEDENTES

El duraluminio es el nombre comercial que se le da a las aleaciones de aluminio, y es ampliamente utilizado en la industria aeronáutica, por sus propiedades mecánicas, sobre todo por su relación peso-resistencia, este es muy ligero y ofrece una buena resistencia. Otro sector en el cual es también empleado, es la industria del termoformado, que por su fácil mecanizado, excelente acabado superficial y buena resistencia mecánica, ofrece bajos costos de producción.

En el año 2004, Leijun Li, Kevin Orme, and Wenbin Yu, en su publicación, Efectos del diseño de la junta en la propiedades mecánicas en un elemento soldado de AL7075 (*Effect of Joint Design on Mechanical Properties of AL7075 Weldment*), encontraron los efectos del diseño de la junta en las propiedades mecánicas de chapa en aluminio AL7075-T6 en el más reciente sistema automatizado de *gas-tungsten arc-welding*. Usando como material de aporte ER5356, fueron hechas soldaduras de penetración completa en piezas de trabajo con varios ángulos de junta incluidos. Pruebas de propiedades mecánicas de las juntas fueron hechas en condiciones de envejecimiento natural y tratamiento térmico pos soldadura. Los resultados muestran que por usar aporte resistente al agrietamiento, y al seleccionar el apropiado diseño de la junta y del tratamiento pos soldadura, soldaduras confiables se pueden producir en el fino material de lámina AL7075. Un modelo de elasticidad de la junta soldada fue establecido para ayudar a entender el comportamiento mecánico de las juntas. Un diseño de la junta sub-ajustado demuestra que es capaz de lograr una resistencia de la junta que coincide con la resistencia del material base.

En el año 2005, K. Srinivasa Rao and K Prasad Rao, en su artículo científico, Zona de Fusión de las Soldaduras por GTA de la aleación AA6061: Estudio de Polarización e Impedancia Electroquímica. (*Fusion zone of a AA6061 alloy GTA welds, electrochemical polarisation and impedance study*), estudiaron el comportamiento de la corrosión, en la zona de fusión en soldaduras por el proceso *Gas Tungsten Arc* (GTA) de la aleación AA6061. Las soldaduras fueron hechas con aporte AA4340 y AA5356, usando las técnicas de corriente continua (CC) y corriente pulsada (PC) del proceso de soldeo GTA. La prueba de polarización e impedancia dinámica fueron usadas para determinar la resistencia de la picadura y la corrosión general en la zona de fusión respectivamente. Estudios con microscopio electrónico óptico y de barrido (SEM) fueron llevados para encontrar el mecanismo de corrosión. Se encontró que las zonas de fusión de soldaduras hechas con el aporte AA4043 presentan mejor resistencia a la corrosión que las soldaduras hechas con

el aporte AA5356. La técnica PC mejora la resistencia a la corrosión por picadura en general en la zona de fusión de las soldaduras por GTA.

Y en el año 2006, V. Balasubramanian, V. Ravisankar, and G. Madhusudhan Reddy, en su investigación, Efecto del Tratamiento de Envejecimiento Pos-soldadura en el Comportamiento a la Fatiga de Juntas Soldadas con Corriente Pulsada en la Aleación de Aluminio AA7075 (*Effect of Postweld Aging Treatment on Fatigue Behavior of Pulsed Current Welded AA7075 Aluminum Alloy Joints*), informan el efecto del Tratamiento de Envejecimiento Pos-soldadura en el Comportamiento a la Fatiga de Juntas Soldadas con Corriente Pulsada en la Aleación de Aluminio AA7075. La aleación de aluminio AA7075 (aleación de Al-Zn-Mg-Cu) ha ganado una amplia aceptación en la fabricación de estructuras ligeras en peso que requieren una alta relación peso-resistencia, tales como vigas de puentes, vehículos militares, carro tanques, y sistemas de transporte ferroviario. En la aleación de aluminio AA7075 los procesos de soldadura preferidos son, frecuentemente, el proceso *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) y el proceso *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), debido a su comparablemente fácil aplicación y mayor economía. Las zonas de fusión de las soldaduras suelen exhibir granos columnares gruesos, debido a las prevalecientes condiciones térmicas durante la solidificación del metal de soldadura. Esto generalmente resulta en propiedades mecánicas del depósito de soldadura inferiores, y poca resistencia al agrietamiento en caliente. En esta investigación, se ha hecho un intento para refinar los granos de la zona de fusión con la aplicación de la técnica de corriente pulsada. Platinas laminadas de 10 mm de espesor han sido usadas como material base para la preparación de uniones soldadas con pases múltiples. La configuración de la junta en V sencilla a tope, ha sido seleccionada para la unión de las láminas. El metal de aporte usado para la unión de las platinas es AA5356 (al-5Mg (wt. %)) grado de aleación de aluminio. Cuatro técnicas diferentes de soldeo han sido usadas para fabricar las juntas, y estas son: los procesos i) GTAW en corriente continua (CCGTAW), ii) GTAW en corriente pulsada (PCGTAW), iii) GMAW en corriente continua (CCGMAW), iv) GMAW en corriente pulsada (PCGMAW). Argón (99,99 de pureza) ha sido usado como el gas de protección. La máquina de prueba a la fatiga de doblado por rotación ha sido usada para evaluar el comportamiento a la fatiga de las uniones soldadas.

MSB Ltda., ya ha realizado algunas pruebas con distintos tipos de procesos como:

- Se probó fabricando un calzo, el cual iba unido mediante tornillos y adhesivo *Loctite*, pero el método resulto ser muy costoso, ya que para realizar una reparación completa, primero se debe mecanizar el molde, y así poder insertar el calzo, aplicar el adhesivo y sujetar con tornillos especiales en duraluminio, estos garantizan que el calzo no se mueva o se salga del molde durante su

servicio, y por ultimo nuevamente mecanizar el calzo junto con el molde para dar su forma nuevamente. Resultado: El molde trabajo normalmente, pero el costo de este proceso es muy alto, sumándole que el tiempo de reparación es prolongado por la cantidad de pasos que se deben realizar.

- Se realizó una reparación con soldadura con electrodo revestido de aluminio (SMAW). Resultado: el calor inducido durante proceso en el molde fue tan alto que fundió el borde totalmente, y también afectó una parte de la cavidad. En definitiva el molde tuvo que ser desechado.
- Se aplicó soldadura con alambre sólido de aluminio (GMAW). Resultado: la inducción de calor en el molde fue mucho menor. Durante el proceso de mecanizado se evidenciaron muchos defectos como socavados y porosidades, los cuales para ser eliminados, se tuvo que soldar y mecanizar entre cuatro y seis veces. Esta opción era muy costosa, ya que era muy incierta la integridad de la soldadura y hubo que mecanizar muchas veces para reparar el molde completamente.

3. DESCRIPCION Y FORMULACION DEL PROBLEMA

Ajover S.A. una empresa que fabrica productos termoformados, ha encomendado a la empresa Metalmecánica Santa Bárbara Ltda. (MSB Ltda.), para que cree una forma de recuperar los moldes de la línea de productos sello plus, que se encuentran fuera de servicio, o tengan que salir de este, afectados por su trabajo en el termoformado de su producto, por las condiciones de abrasión y compresión a las que se someten diariamente. Esta empresa es la única autorizada en Colombia para fabricar este tipo de producto, ya que adquirieron derechos de la patente de su diseñador original, *GN Thermoforming Canadá*.

Hasta el momento, la única forma de continuar con la producción del empaque termoformado sello plus, ha sido acumular en una bodega de equipo inservible, los moldes que por su desgaste ya salieron de servicio, y reemplazarlos por moldes completamente nuevos, que nuevamente se desgastan y siguen acumulándose en bodega.

Luego de un estudio interno de Ajover S.A., se concluyó que la empresa no está en capacidad de seguir adquiriendo moldes nuevos, ya que poseen estos mismos fuera de servicio y con la posibilidad de ser reparados. Esta empresa ha dado como tarea a la empresa MSB Ltda., para que encuentre una forma sostenible de reparar estos moldes cada vez que salgan de servicio.

En este momento la empresa MSB Ltda., se encuentra en la capacidad y disposición de financiar este proyecto, se cuenta con un equipo GTAW con la característica de generar corriente continua o pulsada. También está en la disposición de invertir en las pruebas y ensayos de caracterización de aluminio, adquisición de metales de aporte, fabricación de probetas, pruebas de mecanizado, y demás costos que puedan estar vinculados a la culminación de este proyecto.

En consecuencia, al obtener resultados positivos de este proyecto, las empresas vinculadas se beneficiarían obteniendo menos costos de fabricación y reparación, un método específico y confiable de reparación, tiempos de fabricación estables, ya que no se atienen a la incertidumbre que si algún molde falla tienen que sortear el tiempo, costo, y calidad de las reparaciones.

4. JUSTIFICACIÓN

Si este proyecto tiene una conclusión positiva, la empresa Ajovert S.A. se beneficiaría, porque deberá adquirir equipos nuevos para la fabricación de su producto, sino que podría reparar todos aquellos que tiene almacenados como equipo inservible, y ponerlos nuevamente en servicio. Para Metalmecánica Santa Bárbara Ltda., sería un avance en el alcance de sus procesos y ayudaría a diversificar el tipo de servicios que ofrece a este cliente, llevando a aplicar este procedimiento a otro tipo de moldes, y no limitarlo a los moldes del producto sello plus.

El ahorro de dinero y tiempo será evidente, al cambiar la compra de los moldes por la reparación de estos. En primer lugar se reduce el gasto de dinero, ya que una reparación será más económica con respecto a comprar el molde nuevo. Los tiempos se reducirán, puesto que el molde se compra nuevo directamente a *GN Thermoforming Canadá*, una vez generado el pedido, se tarda de 2 a 3 meses para que el molde llegue a la planta de Ajovert S.A., como las reparaciones se realizan dentro del país y muy cerca de esta planta, el tiempo de reparación será mucho menor comparado al de fabricación.

Según lo indagado ningún investigador ha publicado formalmente un estudio sobre este tema específicamente, lo cual le daría a Metalmecánica Santa Bárbara Ltda. La ventaja en el mercado, ya que tendría un procedimiento específico y confiable para que en un futuro pueda ofrecerle este servicio de reparación a otras empresas que también fabriquen productos termoformados con moldes de duraluminio.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Generar un procedimiento en el que se aplique soldadura de recargue para reparación en espesores delgados en moldes de termoformado en duraluminio con proceso GTAW.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el material del cual están fabricados los moldes de termoformado que producen el producto sello plus de Ajover S.A., y a partir de esto definir materiales de aporte y posibles parámetros y rangos según el equipo con que se cuenta para el procedimiento de reparación.
- Fabricar probetas con los parámetros definidos anteriormente, para que mediante pruebas de mecanizado e inspección visual, seleccionar los parámetros que no generen ninguna discontinuidad en la superficie reparada, generando registros útiles para la generación de la especificación del procedimiento de soldadura.
- Calificar la especificación del procedimiento de soldadura de acuerdo a un criterio que respalde la calidad del procedimiento.

6. MARCOS REFERENCIALES

6.1 MARCO TEORICO

6.1.1 Aluminio.

6.1.1.1 Criterios de designación. Las aleaciones de aluminio pueden ser divididas en dos grandes clases, productos fundidos o forjados (laminados). Estas dos clases pueden ser además subdivididas en familias de aleaciones basadas en composición química y finalmente en designación por temple. Las designaciones por temple son usadas para identificar la condición de la aleación, en otras palabras, la cantidad de trabajo en frío de la que ha sido objeto la aleación o su condición de tratamiento térmico. Hay una serie de sistemas para la identificación de la aleación y de su condición. Utilizaremos como estándar, el método numérico adoptado por el Comité Europeo de Normalización (*European Committee for Standardisation – CEN*). Este sistema usa cuatro dígitos para identificar aleaciones forjadas y cinco dígitos para identificar aleaciones fundidas. Y es generalmente el mismo método numérico de identificación tanto en ISO como en E.E.U.U, donde un número de cuatro dígitos identifica únicamente la composición de la aleación. Esto de acuerdo con la recomendación hecha a principios de 1970s en un Sistema Internacional de Designación usado por la Asociación del Aluminio (*Aluminum Association*) en Estados Unidos. Los límites de la composición química fijados en la especificación de CEN, son idénticos a los inscritos por la Asociación del Aluminio para aleaciones equivalentes. Esto debería simplificar la fuente de las aleaciones y eliminar la confusión que pueda abarcar la identificación de grados específicos. Un problema eterno para el ingeniero de soldadura, es el uso de especificaciones de designación diferentes para identificar la composición de la aleación.

6.1.1.2 Elementos de aleación. Los principales elementos de aleación son cobre, silicio, manganeso, magnesio, litio y zinc. Elementos tales como níquel, cromo, titanio, zirconio y escandio pueden ser agregados en cantidades pequeñas para conseguir propiedades específicas. Otros elementos también podrían estar presentes en pequeñas cantidades como impurezas no deseadas. Estos elementos, conocidos como impurezas o elementos residuales, tienen efectos no benéficos en

las propiedades mecánicas, los productores de aluminio intentan eliminarlos de sus productos. Los principales efectos de los elementos de aleación son los siguientes:

- Magnesio (Mg): Incrementa la resistencia a través del fortalecimiento de la solución sólida y mejora la capacidad del trabajo de endurecimiento.
- Manganeso (Mn): Incrementa la resistencia a través del fortalecimiento de la solución sólida y mejora la capacidad del trabajo de endurecimiento.
- Cobre (Cu): Da un aumento sustancial en la resistencia, permite el endurecimiento por precipitación, reduce la resistencia a la corrosión, la ductilidad y la soldabilidad.
- Silicio (Si): Incrementa la resistencia y la ductilidad, combinado con el magnesio produce endurecimiento por precipitación.
- Zinc (Zn): incrementa sustancialmente la resistencia, permite el endurecimiento por precipitación, puede causar *stress corrosion*.
- Hierro (Fe): Incrementa la resistencia del aluminio puro, generalmente es un elemento residual.
- Cromo (Cr): Incrementa la resistencia al *stress corrosion*.
- Níquel (Ni): Mejora la resistencia a temperaturas elevadas.
- Titanio (Ti): Usado como elemento de refinamiento de grano, particularmente en materiales de aporte (*Filler Metal*).
- Zirconio (Zr): Usado como elemento de refinamiento de grano, particularmente en materiales de aporte (*Filler Metal*).
- Litio (Li): Incrementa sustancialmente la resistencia y el módulo de Young, promueve el endurecimiento por precipitación, disminuye la densidad.
- Escandio (Sc): Incrementa sustancialmente la resistencia por endurecimiento por envejecimiento, un elemento de refinamiento de grano, particularmente en el metal de soldadura (*Weld metal*).
- Plomo (Pb) y Bismuto (Bi): ayudan a la generación de viruta en el mecanizado de estas aleaciones.

6.1.1.3 Sistema de designación CEM.

- Identificación de la Composición de la Aleación.

Hay dos métodos en el sistema CEM para la identificación de la aleación de aluminio, uno basado en la designación numérica adoptada por ISO y tal como se recomendó por *The Aluminum Association*, y la otra en base a la composición química. Los detalles del sistema europeo se encuentran en la norma BS EN 573. Está dividida en cuatro partes así:

- Parte 1, Sistema de designación numérico
- Parte 2, Sistema de designación basado en los símbolos químicos
- Parte 3, Reglas de escritura para la composición química
- Parte 4, Forma de productos

En el sistema europeo el prefijo 'AB' denota lingotes refundidos, 'AC' denota productos fundidos, 'AM' una fundición de aleación maestra, 'AW' un producto forjado. Para las aleaciones forjadas, esta es seguida por un número de cuatro dígitos el cual identifica esa única aleación. El primer dígito indica el elemento principal de la aleación, con los números del 1 al 9 de la siguiente manera:

- AW 1XXX – Aluminio puro comercial.
- AW 2XXX – Aleaciones Aluminio-Cobre.
- AW 3XXX – Aleaciones Aluminio-Manganeso.
- AW 4XXX – Aleaciones Aluminio-Silicio.
- AW 5XXX – Aleaciones Aluminio-Magnesio.
- AW 6XXX – Aleaciones Aluminio-Magnesio-Silicio.
- AW 7XXX – Aleaciones Aluminio-Zinc-Magnesio.
- AW 8XXX – Otro elementos tales como Litio, Hierro.
- AW 9XXX – Aleaciones sin grupo asignado.

Excepto en el caso de las aleaciones de aluminio puro comercial, los tres últimos dígitos son puramente arbitrarios y simplemente identifican la aleación específica. En el caso del aluminio puro, sin embargo, los dos últimos dígitos indican el mínimo porcentaje de aluminio en el producto cercano del 0,01%, por ejemplo AW-1098 tiene 99,98% de Al, AW-1090 tiene 99,90% de Al. El segundo dígito da el grado de control en impurezas: un cero indica impurezas naturales limitadas, una cifra entre el 1 y 9, hay un control especial de una o más impurezas individuales o elementos aleantes.

Hay un total de 36 composiciones independientes en las aleaciones fundidas, divididas en 11 subsecciones de la siguiente manera. Vale la pena mencionar que 29 de las aleaciones están basadas en el sistema Al-Si.

- AC 2 1 XXX – Al Cu.
- AC 4 1 XXX – Al SiMgTi.
- AC 4 2 XXX – Al Si7Mg.
- AC 4 3 XXX – Al Si10Mg.

- AC 4 4 XXX – Al Si.
- AC 4 5 XXX – Al Si5Cu.
- AC 4 6 XXX – Al Si9Cu.
- AC 4 7 XXX – Al Si(Cu).
- AC 4 8 XXX – Al SiCuNiMg.
- AC 5 1 XXX – Al Mg.
- AC 7 1 XXX – Al ZnMg.

Al igual que con las aleaciones forjadas, los tres y cuatro dígitos identifican la aleación específica en el grupo y son arbitrarios.

6.1.1.4 Designaciones de templado. Las propiedades mecánicas de las aleaciones no son solo afectadas por su composición química sino también por su condición, tales como recocido, trabajado en frío, endurecimiento por precipitación. Evidentemente, es importante que esta condición es, claramente e inequívocamente identificada tanto por los diseñadores, como por los ingenieros en soldadura. Para hacer esto, CEM ha desarrollado un sistema de sufijos que identifican el valor del endurecimiento por deformación que la aleación ha sufrido o la condición del tratamiento térmico. Hay cinco designaciones básicas identificadas por una sola letra, que puede ser seguida por uno o más números que identifican la condición precisa.

- F – De fábrica. Esta aplica para productos forjados, donde no hay control del valor del endurecimiento por deformación o del tratamiento térmico. No hay propiedades mecánicas específicas para esta condición.
- O – Recocido. Esto es para los productos que son recocidos para generar una reducción en la resistencia. Puede haber un sufijo para indicar el tratamiento térmico específico.
- H – Endurecimiento por deformación (trabajado en frío). La letra H es siempre seguida por al menos dos dígitos, para identificar el valor del trabajo en frío y cualquier tratamiento térmico que se ha llevado a cabo para lograr las propiedades mecánicas requeridas.
- W – Tratado térmicamente en solución. Este aplica para las aleaciones endurecidas por precipitación a temperatura ambiente (Envejecimiento natural) después de ser tratado térmicamente en solución. Seguido por un tiempo, indicando el periodo de envejecimiento natural, por ejemplo W 1h.
- T – Tratamiento térmico. Esta identifica a las aleaciones que son envejecidas para producir una condición estable. La T es siempre seguida por 1 o más números que identifican el tratamiento térmico específico.

El primer dígito luego de la H identifica la condición básica.

- H1 – Solo endurecimiento por deformación.
- H2 – Endurecido por deformación y parcialmente recocido. Esto aplica para las aleaciones que son endurecidas más de lo requerido, y que son luego recocidas a una baja temperatura para ablandarlas y lograr la dureza y resistencia deseadas.
- H3 – Endurecido por deformación y estabilizado. La estabilización es un tratamiento térmico aplicado a baja temperatura durante o después de su conformado. Esto mejora la ductilidad y estabiliza las propiedades de aleaciones endurecidas por deformación que se ablandan con el tiempo.
- H4 – Endurecido por deformación y pintado. Esto es para aleaciones que pueden ser sometidas a un tratamiento térmico de baja temperatura como parte de una pintura de horno o curación de una operación adhesiva.

El segundo dígito luego de la H indica el valor del endurecimiento por deformación en la aleación. H18 es el endurecimiento por deformación únicamente y en la más intensa condición de trabajo en frío. Por lo tanto, es la condición más difícil y alta de la fuerza. La ductilidad puede ser muy baja, además el trabajo en frío puede generar agrietamiento. Condiciones intermedias son identificadas por los números 1 al 7 y son basadas en la resistencia relativa tal como la de una aleación recocida.

El tercer dígito luego de H no es mandatorio y es usado cuando la aleación requiere un control especial, para lograr un temple específico identificado por el segundo dígito, o cuando algunas otras características de la aleación son afectadas. Ejemplos de tales características “*exfoliation corrosion resistance*”, tubos con costura soldados o trabajo adicional luego de haber logrado el temple final. Por ejemplo por estampado.

Las designaciones T son aplicadas a aquellas aleaciones endurecidas por envejecimiento, el primer dígito denomina el tratamiento térmico básico.

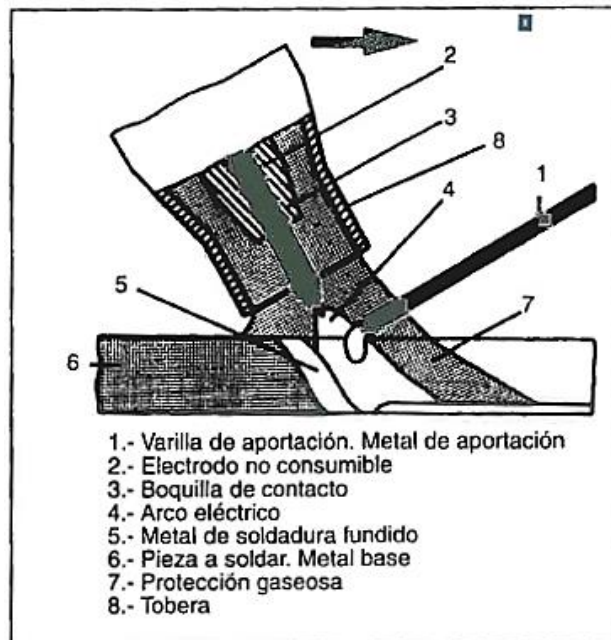
- T1 – Enfriado de un tratamiento a elevada temperatura de conformado y envejecido naturalmente
- T2 – Enfriado de un proceso a elevada temperatura de conformado, trabajado en frío y envejecido naturalmente
- T3 – Tratado con solución caliente, trabajo en frío y envejecimiento natural.
- T4 – Tratado con solución caliente y envejecimiento natural.

- T5 – Enfriado de un proceso a elevada temperatura de conformado y envejecido artificialmente.
- T6 – Tratado con solución caliente y envejecido artificialmente.
- T7 – Tratado con solución caliente y sobre envejecido o estabilizado.
- T8 – Tratado con solución caliente, trabajado en frío y envejecido artificialmente.
- T9 – Tratado con solución caliente, envejecido artificialmente y trabajado en frío.

6.1.2 Proceso de soldeo TIG (GTAW)

6.1.2.1 Descripción y denominaciones. El procedimiento de soldeo por arco bajo gas protector con electrodo no consumible, también llamado TIG (*Tungsten Inert Gas*), utiliza como fuente de energía el arco eléctrico que se establece entre un electrodo no consumible y la pieza a soldar, mientras un gas inerte protege el baño de fusión. El material de aporte, cuando se utiliza, se aplica por medio de varillas como en el soldeo oxiacetilénico. La siguiente figura muestra esquemáticamente los principios del proceso GTAW.

Figura 1. Descripción del proceso GTAW.



Fuente: Tomado del Manual del soldador 17ª Edición, Capítulo 12. Principios del soldeo TIG; Pág. 245. 2002.

Hay que recordar también que wolframio (o volframio) y tungsteno son dos denominaciones para el mismo metal cuyo símbolo en la tabla periódica es W.

El proceso de soldeo TIG también recibe las denominaciones de:

- GTAW, *Gas Tungsten Arc Welding* (ANSI/AWS A3.0)
- 141, Soldeo por arco con electrodo de wolframio y gas inerte (EN 24063)
- Soldeo por arco con electrodo de wolframio (UNE 14-100).
- *Gas-Shielded Tungsten-Arc Welding* (Reino Unido)

6.1.2.2 Ventajas y limitaciones

- Ventajas

- Proceso adecuado para unir la mayoría de los metales
- Arco estable y concentrado
- Aunque se trata de un proceso esencialmente manual, se ha autorizado para algunas fabricaciones en serie, como tubería de pequeño espesor soldada longitudinal o helicoidalmente y para la fijación de tubos a placas en intercambiadores de calor.
- No se producen proyecciones (al no existir transporte de material en el arco).
- No se produce escoria.
- Produce soldaduras lisas y regulares.
- Se puede utilizar con o sin metal de aporte, en función de la aplicación.
- Puede emplearse en todo tipo de uniones y de posiciones.
- Alta velocidad de soldeo en espesores por debajo de 4 mm.
- Se pueden conseguir soldaduras de gran calidad.
- Permite un control excelente de la penetración en la pasada de raíz.
- No requiere el empleo de fuente de energía excesivamente cara.
- Permite el control independiente de la fuente de energía y el metal de aportación.

- Limitaciones

- La tasa de deposición es menor que la que se puede conseguir con otros procesos de soldeo por arco (en el soldeo automático esta desventaja se puede solucionar con la técnica de alambre caliente).
- Su aplicación manual exige, en general, gran habilidad por parte del soldador.

- No resulta económico para espesores mayores de 10 mm.
- En presencia de corrientes de aire puede resultar difícil conseguir una protección adecuada de la zona de soldadura.

6.1.2.3 Aplicaciones. El proceso TIG se puede utilizar para el soldeo de todos los materiales, incluidos el aluminio y el magnesio, y los materiales sensibles a la oxidación como el titanio, circonio, y sus aleaciones.

Puesto que el proceso posee las virtudes necesarias para conseguir soldaduras de alta calidad y con una elevada pureza metalúrgica, exentas de defectos y buen acabado superficial, es ideal para soldaduras de responsabilidad en la industria del petróleo, química, petroquímica, alimentos, generación de energía, nuclear y aeroespacial.

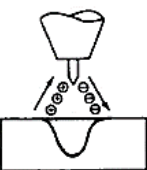
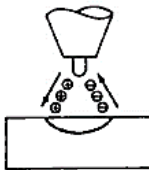
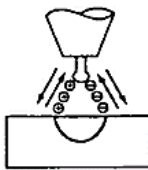
Como su tasa de deposición es baja, no resulta económico para soldar materiales con espesores mayores a 10 mm. En estos casos, el TIG se utiliza para efectuar la pasada de raíz, empleándose otros procesos de mayor productividad para el resto de las pasadas de relleno.

También se puede utilizar para realizar soldaduras por puntos y por costuras.

6.1.2.4 Selección del tipo de corriente. El proceso TIG puede utilizarse tanto con corriente continua como con corriente alterna. La elección de la clase de corriente y polaridad se hará en función del material a soldar. Con el fin de realizar esta elección correctamente, se van a destacar algunos aspectos diferenciales de ambas alternativas.

- Arco con corriente continua. La polaridad recomendada en corriente continua es la directa, ya que si se suelda con polaridad inversa se tienen que utilizar intensidades muy bajas, para que no se sobrecaliente el electrodo que resulta impracticable al soldar.
- Arco con corriente alterna. El buen comportamiento durante el semiciclo de polaridad directa y el efecto decapante del baño durante el semiciclo de polaridad inversa, por lo que suele emplearse en el soldeo de aleaciones ligeras, tales como las de aluminio y magnesio.

Figura 2. Características del soldeo de acuerdo a la corriente seleccionada.

Tipo de corriente	Corriente continua	Corriente continua	Corriente alterna
Polaridad	Directa	Inversa	
Flujo de electrones e iones			
Aspecto de la penetración			
Acción decapantes	No	Sí	Sí. Una vez durante el semiciclo positivo
Balance calórico (aproximado)	70% en la pieza. 30% en la punta del electrodo	30% en la pieza. 70% en la punta del electrodo	50% en la pieza. 50% en la punta del electrodo
Penetración	Profunda y estrecha	Ancha y menos profunda	Media
Comportamiento del electrodo	Excelente. Ej. 400 A; 3,2 mm	Pobre. Ej. 30 A; 3,2 mm	Buena. Ej. 225 A; 3,2 mm

Fuente: Tomado del Manual del soldador 17ª Edición, Capítulo 12. Principios del soldeo TIG; Pág. 248. 2002.

Como principales inconvenientes presenta dificultades de cebado y de estabilidad del arco, lo que obliga a incorporar al equipo un generador de alta frecuencia.

Con corriente alterna, el arco se apaga cada vez que el voltaje es nulo, dos veces cada ciclo. Para mejorar la estabilidad, la tensión de vacío debe incrementarse. Como ejemplo se requiere una tensión de vacío de 100V con helio como protección. La tensión necesaria puede obtenerse añadiendo al transformador una fuente de alta frecuencia. El voltaje de la fuente de alta frecuencia puede ser del orden de 1000V y con una frecuencia del orden de MHz. La corriente de alta frecuencia puede ser aplicada continuamente, o cada vez que la corriente de soldeo pasa por cero. La selección se realiza desde el panel de control del equipo.

6.1.2.5 Equipo de soldeo. El equipo básico para el soldeo TIG consiste en una fuente de energía o de alimentación, un porta electrodos, electrodo, cables de soldeo, botellas de gas inerte y mangueras para la conducción del gas.

- Fuente de energía

La fuente de energía para el soldeo TIG debe presentar una característica descendente (intensidad constante), para que la corriente de soldeo se vea poco afectada por las variaciones en la longitud del arco.

La fuente de energía debe tener un rango de variación continua de intensidad y una intensidad mínima baja (5 – 8A). Lo último es importante para la función “disminución progresiva de intensidad o control de pendiente”. Además la fuente de energía debe ser capaz de suministrar una intensidad tan alta como sea requerida para los espesores y el material que se va a soldar. Se da a continuación una indicación de las intensidades requeridas por milímetro de espesor de chapa para diferentes materiales.

Acero baja aleación	30-40A
Aluminio	45-50A
Cobre	75-80A
Acero Inoxidable	30-40A

- Tipos de fuente en corriente alterna

- Transformadores con un control adicional para la unidad de alta frecuencia y la unidad de control de gas.
- Equipo de soldeo TIG con capacidad para corriente alterna y corriente continua.

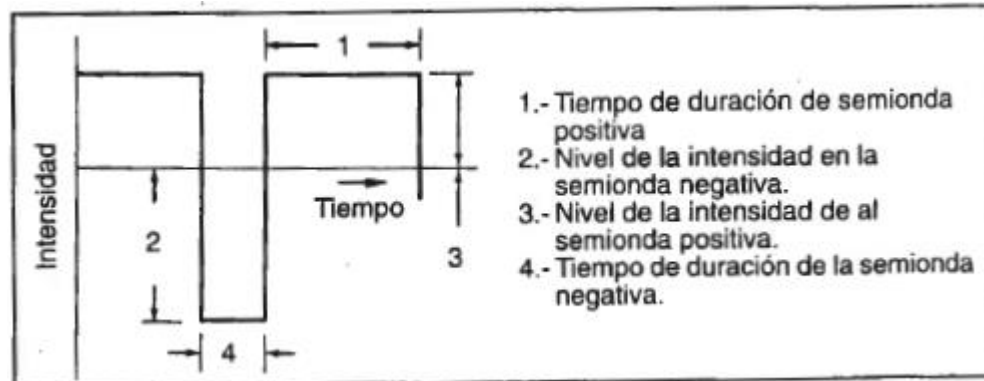
Se emplea corriente alterna para favorecer el decapado de la capa de óxido en aleaciones de aluminio y magnesio, también se utiliza para el soldeo de materiales de bajo espesor.

Las fuentes de corriente alterna convencionales utilizan una onda sinusoidal simplemente transformando la onda de la red para adecuar los parámetros de intensidad y tensión. El arco con corriente alterna es inestable, por lo que se utilizan diferentes medios para estabilizar el arco durante el soldeo como son: generador de impulsos de alta frecuencia, filtros capacitivos o empleo de fuentes de onda cuadrada.

Las fuentes de onda cuadrada pueden cambiar el sentido de la corriente de soldeo en muy poco tiempo, permitiendo una óptima activación de la semionda positiva y negativa consiguiéndose gran estabilidad. Algunas fuentes de onda cuadrada

poseen un control de balance de la onda, estas fuentes ajustan el nivel de intensidad que se alcanza en la semionda positiva y en la negativa. Otras fuentes de onda cuadrada ajustan también el tiempo de cada semionda. Las características de la onda cuadrada con control de balance son muy utilizadas en el soldeo de aluminio y sus aleaciones.

Figura 3. Características de la onda cuadrada para corriente alterna.



Fuente: Tomado del Manual del soldador 17ª Edición, Capítulo 12. Principios del soldeo TIG; Pág. 251. 2002.

Tipos de fuente de energía para soldeo con corriente continua

- Equipos ordinarios para trabajar con electrodos revestidos en corriente continua, equipados con porta electrodos TIG. Esta es la situación más simple pero tiene sus limitaciones, especialmente al comenzar y terminar la soldadura.
- El mismo que el anterior pero equipado con un control de gas y otras funciones necesarias.
- Rectificador especialmente preparado para el soldeo TIG. La máquina posee una unidad de control de gas, una unidad de alta frecuencia y otras funciones necesarias.

6.1.2.6 Funciones.

Función de control de pendiente (*electroslope*)

Algunos equipos poseen integrada una función de control de pendiente. Durante la pendiente positiva la corriente se incrementa paulatinamente en el momento de arranque. Esto da al soldador más tiempo para colocar el electrodo en la posición de soldeo. También reduce el riesgo de fusión del electrodo.

La función de pendiente negativa, conocida también como función del llenado del rechupe, permite una reducción gradual de la corriente al final de la soldadura. Esto evita la formación de defectos de soldeo causados por la aparición de rechupes que se podrían formar al final de la soldadura.

Temporización de pos-flujo (*postflow time*) y pre-flujo (*preflow time*) de gas de protección.

Con objeto de mejorar la protección al inicio y final de la soldadura, se puede seleccionar el tiempo de salida del gas de protección antes de cebar el arco (*preflow time*), con esto se retira el aire que rodea el material base en la zona de cebado y se crea una atmosfera formada únicamente por el gas de protección.

Más importante es la regulación del tiempo de salida del gas de protección después de la extinción del arco (*postflow time*), con ello se asegura que el material recién depositado este perfectamente protegido hasta que se enfríe lo suficiente. También se evita la contaminación del electrodo del tungsteno por oxidación de este.

Si no existiera esta función será el soldador el que debe dejar salir el gas durante un cierto tiempo antes del inicio y después de la extinción del arco.

7. ALCANCE Y DELIMITACION

Este proyecto será asistido por la empresa Metalmecánica Santa Bárbara Ltda., ubicada en la Carrera 68A # 39I – 06 Sur, Barrio Santa Yolanda, Localidad de Tunjuelito, Ciudad Bogotá D.C., Colombia, en aprobación de la Empresa Ajoever S.A., dirigido a la reparación del cierre hermético de los moldes de los productos Sello Plus, en todas su gama de capacidades (8, 16, 24 y 48 OZ).

La reparación se realizara con el proceso GTAW, con un equipo *Syncrowave* 200 del Fabricante *Miller Welds* y material de aporte que se distribuya en el mercado nacional.

La especificación del procedimiento de soldadura se hará según recomendación Código ASME Sección IX (*Qualification Standard for Welding and Brazing Procederes, Welters, Brazers, and Welding and Brazing Operators*)

8. METODOLOGÍA

8.1 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

8.1.1 Composición Química. Para conocer la composición química del molde se utilizó la técnica de espectrometría de emisión óptica con un equipo *Baird Spectrovac*.

8.1.2 Dureza. Para Identificar la dureza de la cavidad en aluminio de la sección que será reparada, se utilizó un durómetro *GNEHM HORGEM 160* y un equipo de medición compuesto por un microscopio *LECO 500* con cámara, un software de lectura y análisis de imágenes *LECO IA32*, con resolución de medida de 1 μm .

El procedimiento para la toma de dureza se realizó según norma ASTM E10-10 Método de Ensayo Normalizado para Dureza Brinell en Materiales Metálicos (*Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*).

8.1.3 Metalografía. Para la generación de imágenes se utilizó un microscopio *LECO 500* con cámara, un software de lectura y análisis de imágenes *LECO IA32*.

El procedimiento para la preparación de las probetas fue el recomendado en la norma ASTM E3-11 Guía Normalizada para la Preparación de Muestras Metalográficas (*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*).

8.1.4 Fabricación de Probetas. Para la Fabricación de las probetas se utilizó un aluminio de referencia AA 6061-T6, suministrado por El Grupo Alúmina de Colombia, el cual también entregó el certificado de calidad que garantiza la fiabilidad en el material.

Se utilizaron varillas de aporte de 1/8" y 1/16" de pulgada de diámetro, para el proceso GTAW de aluminio, de referencia AWS ER 4043 suministradas por el distribuidor INVERWILCAR y fabricadas por West Arco Colombia.

Para la aplicación de la soldadura se utilizó un equipo del fabricante *Miller*, de referencia *Syncrowave 200*, dirigido al trabajo con procesos GTAW y SMAW, que cuenta con operación en corriente continua y corriente alterna, esta última con la opción de trabajo en alta frecuencia recomendado para soldar aluminio.

La antorcha para la soldadura está compuesta por dos toberas en cerámica una #4 y la otra #7, dos electrodos en tungsteno de 3/32" y 1/8" de pulgada de diámetro, y con forma esférica según el manual del fabricante del equipo de soldadura.

Para el mecanizado se utilizó un centro de mecanizado del fabricante *Leadwell* de referencia V-40, con desplazamiento en tres ejes, un escariador de punta esférica de marca SGS Tools y una herramienta de forma fabricada especialmente para la reparación de estos moldes.

8.1.5 Especificación del procedimiento de soldadura. Para la generación del procedimiento de soldadura se utilizó como base general el artículo V, Estándar para la Especificación del Procedimiento de Soldadura (*Standard Welding Procedure Specifications*) en la sección IX Estándar de Calificación para Procedimientos de Soldadura (*Welding and Brazing*), soldadores (*Welders and Brazers*) y operadores de soldadura (*Welding and Brazing Operators*) (*Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators*) del código internacional ASME Calderas y Recipientes a Presión (*ASME Boiler and Pressure Vessel Code*)

8.2 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

Cada uno de los siguientes puntos, enumera los pasos que se siguieron para llevar a cabo esta investigación:

- Caracterización del material
- Fabricación de probetas
- Pruebas de soldadura
- Generación de la especificación del procedimiento de soldadura

8.2.1 Caracterización del aluminio. Para determinar la especificación bajo la cual esta designado el aluminio de los moldes, se realizaron 3 ensayos en el Laboratorio de Materiales y Procesos del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Estos ensayos practicados a la cavidad fueron de espectrometría de emisión óptica, para conocer la composición química. De dureza, para identificar si tiene algún tratamiento térmico o mecánico y por último una metalografía, para saber bajo qué proceso fue fabricado el aluminio.

Se realizó un corte con medidas 145 x 51 x 10mm, en una sección que no afecta la funcionalidad o servicio del molde en operación, y se envió al laboratorio de materiales de la Universidad Nacional de Bogotá.

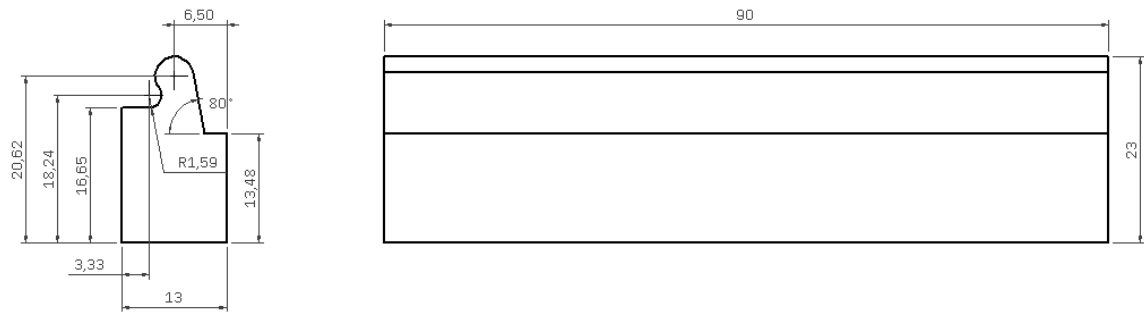
La muestra enviada a este laboratorio fue extraída de un molde que suministro su propietario, Ajoever S.A., de condición no devolutiva, para hacer todas las pruebas y ensayos necesarios para esta investigación.

En la primera prueba de laboratorio, se hicieron 3 ensayos en el espectrómetro de emisión óptica al material, de los cuales se hizo un promedio de cada uno de los elementos que hacen parte de la composición química, y con este se realizó una comparación en la Tabla 2. Composición del aluminio forjado no aleado y del aluminio forjado aleado (*Composition of wrought unalloyed aluminum and wrought aluminum alloys*), en la página 62, del Volumen 2, Propiedades y Selección de Aleaciones no Ferrosas y Materiales con Propósito Especial (*Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*), del Manual de Metales de ASM (*ASM Metals Handbook*). En la segunda prueba de laboratorio se hicieron 5 tomas de dureza en distintas partes de la muestra. Y en la tercer y última prueba, se realizó una metalografía en 3 diferentes direcciones de la muestra y se analizaron estas imágenes para identificar el tipo de conformado de este material.

8.2.2 Fabricación de probetas. Las probetas se fabricaron simulando la forma y condición del cierre que se desea reparar. Utilizando el aluminio 6061-T6 certificado, se mecanizaron 20 probetas que sirvieron como base para la determinación de los parámetros para soldar.

Las dimensiones las probetas se muestran en la Figura 4.

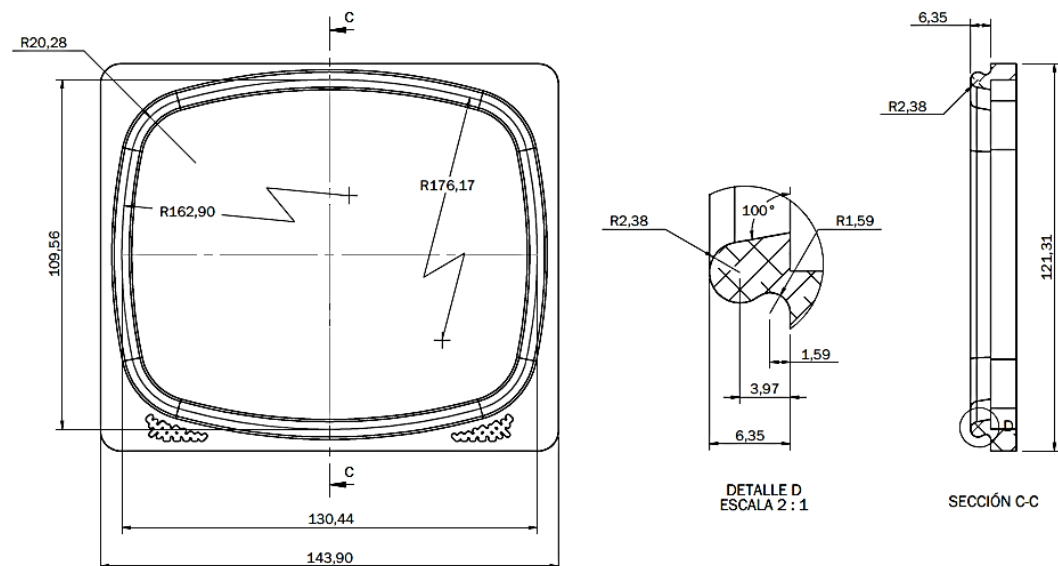
Figura 4. Plano de las probetas.



Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

Este modelo de probeta, se obtuvo a partir de la forma de la sección que se necesita reparar de los moldes. Dicha forma se muestra en el plano de la figura 5.

Figura 5. Plano del molde, sección de reparación.



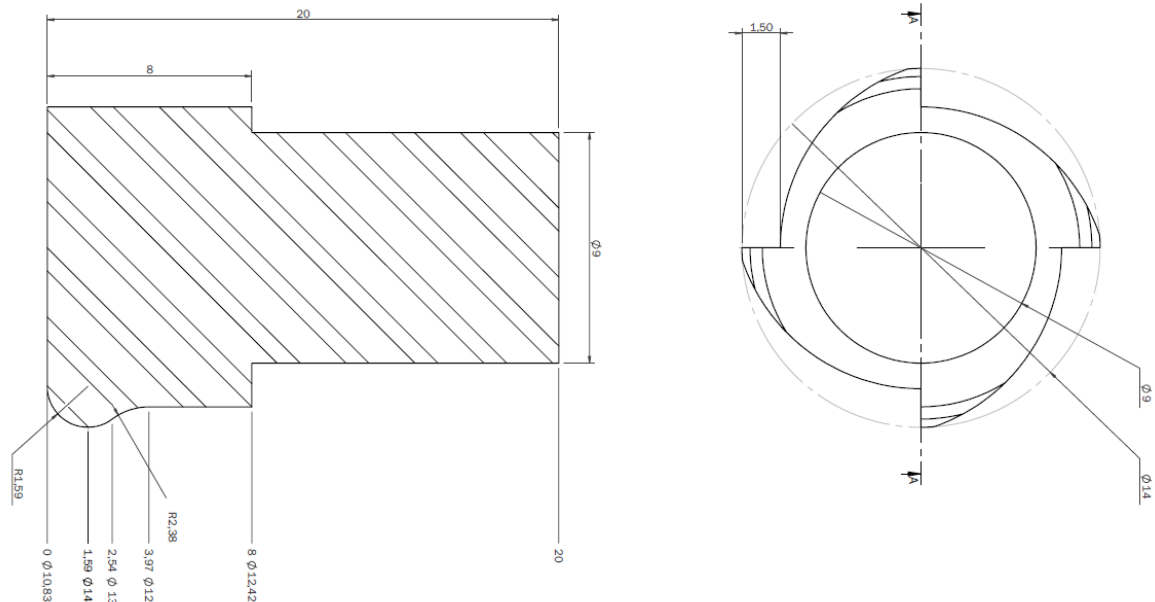
Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

Teniendo la certeza que el material es un aluminio AA 6061-T6, se procedió a adquirir un tramo de material de esta denominación, a un fabricante de aluminio nacional, el cual entregó un certificado de calidad del mismo, garantizando la veracidad de este. Este aluminio fue suministrado de 1000 x 60 x 13 milímetros, el cual fue seccionado en 20 partes de medida 90 x 23 x 13 milímetros.

A continuación se procedió a mecanizar cada una de las piezas, para ello se utilizó un software de manufactura asistida por computador (CAM por sus siglas en ingles), que generó el código para el centro mecanizado y así fabricar las probetas en el menor tiempo posible y con la mayor semejanza a la forma original del molde.

Por último, debido a la complejidad de la forma, y por la limitación de tres ejes de operación en el centro de mecanizado, hubo la necesidad de fabricar una herramienta especial para dar la forma final del cierre, la cual se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Plando de la herramienta de forma.



Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

Para terminar las probetas, se le realizó un proceso de pulido, para asemejar el acabado superficial con el cual el molde se encuentra cuando está en servicio.

Luego de aplicar la soldadura se debe nuevamente mecanizar y pulir la probeta, y con ello darle la forma necesaria para lograr las dimensiones y el acabado superficial para que forme su producto.

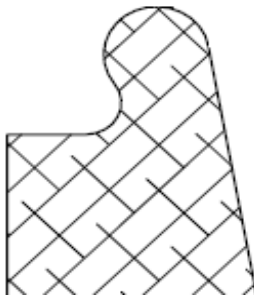
8.2.3 Pruebas de soldadura. Según la experiencia del soldador y tomando como base los parámetros usados en los artículos descritos en los antecedentes de esta investigación, se comenzó usando distintos parámetros y elementos hasta llegar al mejor cordón de soldadura que se pudo aplicar.

Para la selección de las probetas en las cuales la aplicación de la soldadura no produjo ninguna discontinuidad superficial que afecte el trabajo del molde luego de ser reparado, se calificó bajo los siguientes criterios:

- En toda su superficie no tenga poros o socavados
- El calor de la soldadura no haya sido excesivo que haya generado depresiones a lo largo de la superficie reparada.
- Si presenta salpicaduras en las secciones que no se deben soldar es causa para descartar la probeta.
- Si luego del mecanizado presenta poros o discontinuidades que afecten su funcionamiento normal.
- Si después de darle acabado final (Brillo espejo superficial) presenta poros o discontinuidades.

El formato usado para registrar cada uno de los parámetros usados en las pruebas de soldadura se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Formato registros del procedimiento para calificación (PQR).

REGISTROS DEL PROCEDIMIENTO PARA CALIFICACION (PQR)					
Empresa	Metalmecánica Santa Barbara Ltda.				
PQR No.		Fecha			
Proceso de Soldadura	GTAW (TIG)	Tipo	Manual		
Imagen de Reparacion					
					
Material Base					
Denominación	AA 6061 T6	P-No.	23	Grupo-No.	23.1
Aporte y Electro					
Material de Aporte	AWS ER 4043		F-No.	23	
Diametro		Longitud		Tovera No.	
Electrodo	Tungsteno	Diametro		Tipo	Punto Verde
Gas de Proteccion					
Tipo de Gas	Argon 99%		Flujo		
Parametros Electricos					
Tipo de Coriente	Alterna		Polaridad	Electrodo Positivo	
Amperaje		Voltaje		PPS	
Tecnica					
Velocidad de Avance			Espesor de cordon	3 mm	
Precalentamiento					
Temperatura:					
Observaciones:					

Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

8.2.4 Generación de la especificación del procedimiento de soldadura (WPS). Tomando como base la sección IX del código ASME, se utilizó el siguiente procedimiento:

- Según la tabla QW-256, Variables para la especificación del procedimiento de soldadura del proceso de GTAW, del artículo II Requisitos para los Procedimientos de Soldadura (*Article II Welding Procedure Qualifications*) se obtuvieron todas las variables que debe contener el formato del WPS, el cual también califica cada una de estas como esenciales, suplementariamente esenciales, no esenciales y referencia la importancia de las modificaciones de cada una de ellas en el artículo IV Información del Proceso de Soldadura. (*Article IV. Welding Data*)
- En el artículo IV, se tomaron de las tablas de materiales, el P-numero para el material base y el F-numero para el material de aporte, con los cuales se puede conocer si estos dos son metalúrgicamente afines, es decir, hay soldabilidad entre ellos. Este también contiene las dimensiones y las ubicaciones de las probetas que se deben obtener para hacer los ensayos mecánicos, para la calificación de la especificación del procedimiento de soldadura, pero para este proyecto no aplica, ya que esta es una soldadura de reparación en un elemento que no va a estar sometido a presión, únicamente se está tomando como base para generar un documento formal y de comprensión general, para aquellos vinculados al medio de la soldadura.
- Por último se tomó ejemplo la forma QW-482 Formato Sugerido para la Especificación del Procedimiento de Soldadura (*Suggested Format for Welding Procedure Specifications (WPS)*) para la presentación del WPS de este proyecto.

9. RESULTADOS

9.1 CARACTERIZACIÓN DEL ALUMINIO

A continuación se muestran los resultados de las pruebas y sus comparativos que dan la certeza de la designación del aluminio en el cual están fabricados los moldes.

9.1.1 Composición química. En la Tabla 1., se encuentran los resultados de las tres pruebas que se realizaron por medio de la técnica de espectrometría de emisión óptica.

Tabla 1. Resultados de las pruebas de espectrometría de emisión óptica.

Elemento	Prueba 1 (%)	Prueba 2 (%)	Prueba 3 (%)	Promedio %
Aluminio (Al)	97,550	97,333	97,302	97,395
Silicio (Si)	0,576	0,712	0,680	0,656
Hierro (Fe)	0,399	0,460	0,494	0,451
Cobre (Cu)	0,315	0,339	0,330	0,328
Manganeso (Mn)	0,034	0,035	0,037	0,036
Magnesio (Mg)	1,002	0,987	1,022	1,003
Níquel (Ni)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Zinc (Zn)	0,004	0,006	0,006	0,005
Estaño (Sn)	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003
Titanio (Ti)	0,018	0,018	0,017	0,018
Plomo (Pb)	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Cromo (Cr)	0,095	0,099	0,101	0,098
Vanadio (V)	0,007	0,007	0,008	0,007
Cobalto (Co)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

En la Tabla 2 se puede ver la comparación del promedio de los resultados obtenidos en las pruebas de espectrometría con los datos publicados por ASM.

Tabla 2. Comparación de resultados con la norma del aluminio.

Elemento	Promedio	ASM	Cumple
Aluminio (Al)	97,395	95,800 – 98,600	Aprueba
Cromo (Cr)	0,098	0,040 – 0,350	Aprueba
Cobre (Cu)	0,328	0,150 – 0,400	Aprueba
Hierro (Fe)	0,451	Max. 0,700	Aprueba
Magnesio (Mg)	1,003	0,800 – 1,20	Aprueba
Manganeso (Mn)	0,036	Max. 0,150	Aprueba
Silicio (Si)	0,656	0,400 – 0,800	Aprueba
Titanio (Ti)	0,018	Max. 0,150	Aprueba
Zinc (Zn)	0,005	Max. 0,250	Aprueba
Níquel (Ni)	< 0,001	Cada uno de otros elementos Max. 0,050 y el total de los otros elementos Max. 0,150	Aprueba
Estaño (Sn)	< 0,003		
Plomo (Pb)	< 0,002		
Vanadio (V)	0,007		
Cobalto (Co)	< 0,001		

Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

De acuerdo a la comparación de la tabla 2, la composición química, se puede afirmar que el aluminio en el cual están fabricados los moles es AA 6061, ya que todos los rangos y límites de los elementos son consecuentes.

9.1.2 Tratamiento térmico. Para conocer el tipo de tratamiento térmico, se hizo un ensayo de dureza sobre la muestra del molde.

En la muestra se realizaron cinco (5) tomas de Dureza *Brinell* utilizando indentador con esfera de carburo de tungsteno de 5 mm, carga de 250 kilogramos y 10 segundos de tiempo según procedimiento Norma ASTM E10-10.

Los resultados de estas pruebas de dureza realizados al aluminio, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de las pruebas de dureza.

Prueba	Resultado HB
1	103,1
2	107,5
3	103,1
4	105,6
5	105,6
Promedio	104,94

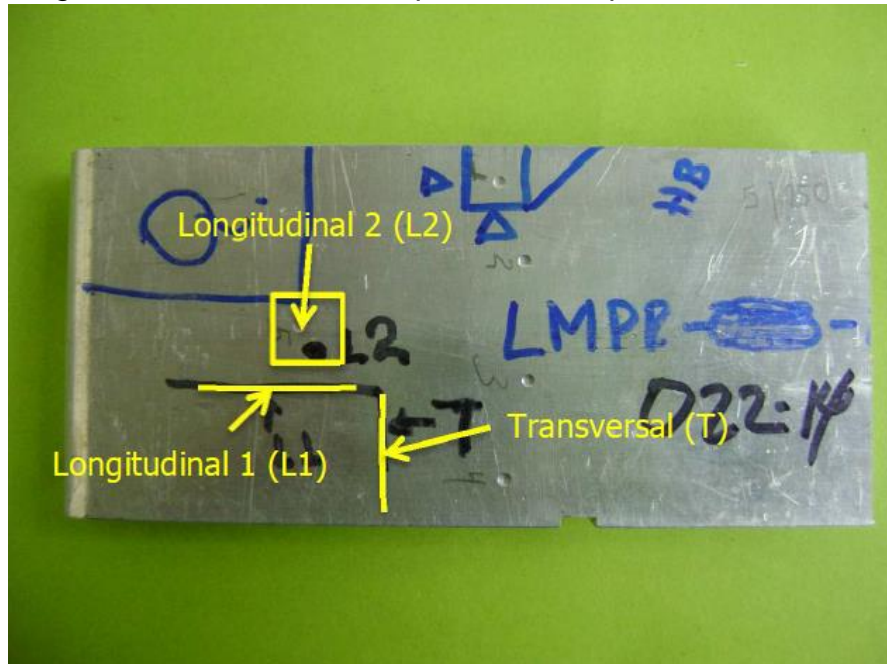
Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

Según la ficha técnica del material, la dureza mínima que debe tener un aluminio AA 6061 con grado de temple T6 debe ser de 95 HB, si comparamos con la dureza promedio registrada en el ensayo, que es de 104,94 HB, se puede decir que cumple con esta.

9.1.3 Conformado del Material. Para analizar completamente las pruebas hechas a la muestra de aluminio enviada a los laboratorios de materiales de la Universidad Nacional de Colombia, se realizó una metalografía, para identificar bajo qué proceso se obtuvo el material del cual fueron fabricados los moldes. La dirección y ubicación de las Figuras 9, 10 y 11 se muestran en la figura 8.

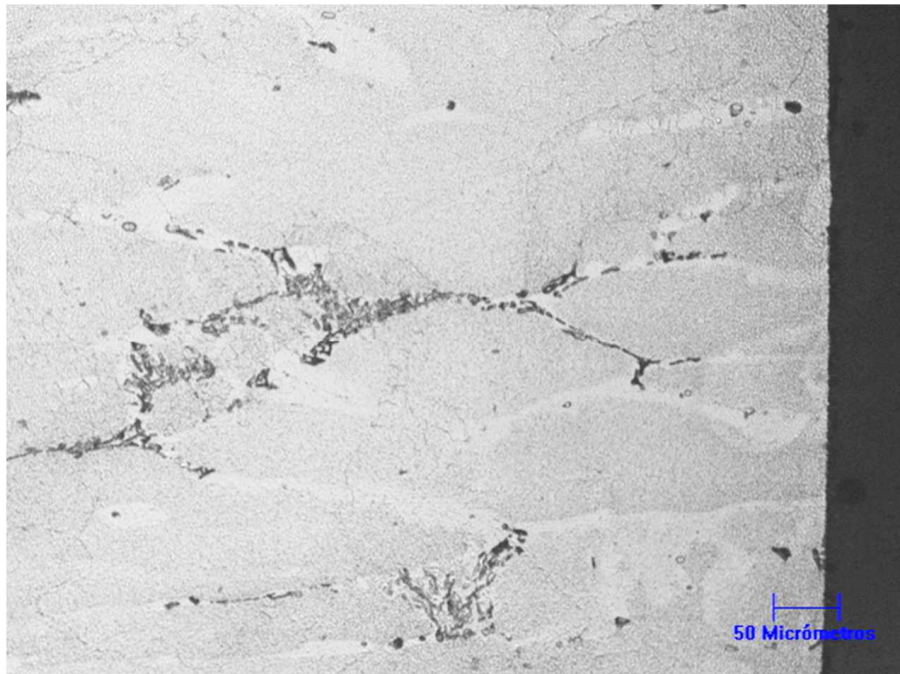
De acuerdo las Figuras 8 y 9, la cuales se muestra una forma de grano alargado, se puede decir que el proceso de conformado por el cual se obtuvo este material fue por laminado.

Figura 8. Imagen de la muestra usada para todas la pruebas de laboratorio.



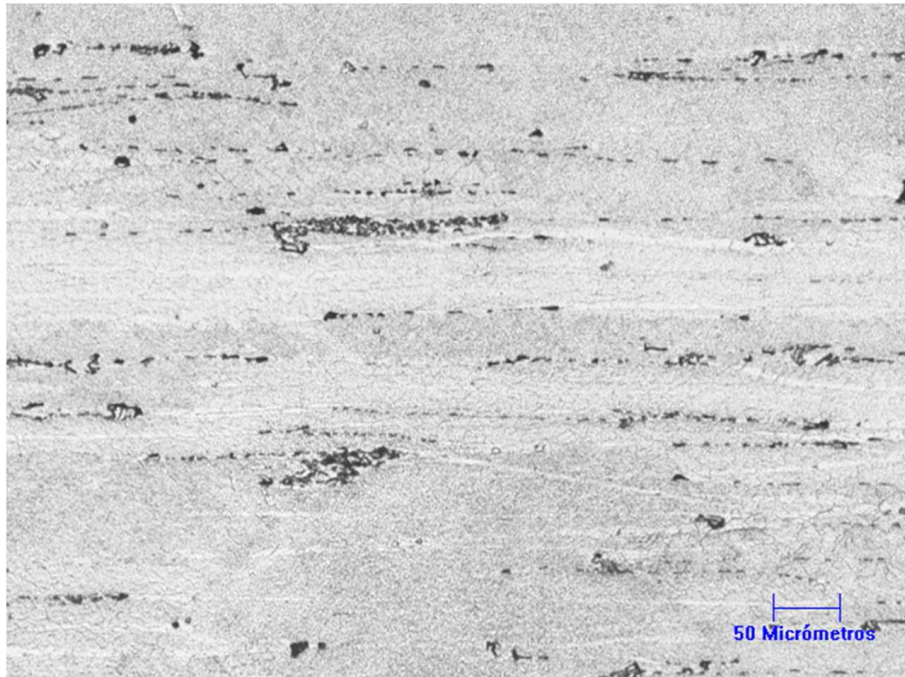
Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

Figura 9. Muestra del bloque de aluminio en la dirección L1 a 200x.



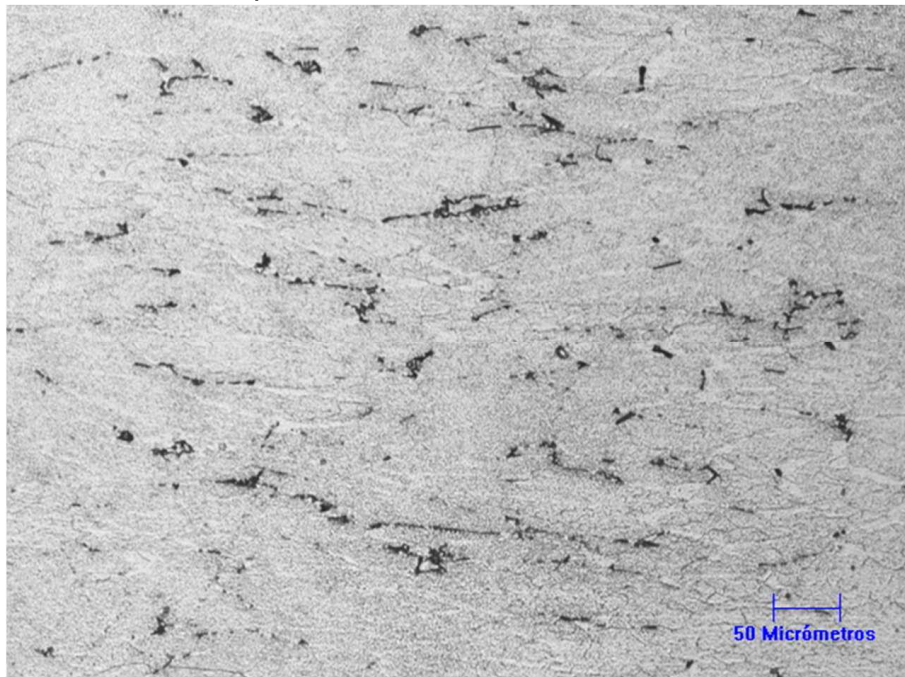
Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

Figura 10. Muestra del bloque de aluminio en la dirección L2 a 200x.



Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

Figura 11. Muestra del bloque de aluminio en la dirección T a 200x.



Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

9.2 PRUEBAS DE SOLDADURA

Para las pruebas de soldadura se utilizaron las 20 probetas mecanizadas según el numeral 4.2.2 Fabricación de Probetas.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de las pruebas de soldadura

Prueba	Amperaje	Voltaje	Diámetro Electrodo	Diámetro Aporte	Número de Tobera	Temperatura precalentamiento	PPS	Velocidad
1	90 A	45 V	1/8"	1/8"	7	20° C	10	4,5 pulg/min
2	88 A	44 V	1/8"	1/8"	7	20° C	10	4,5 pulg/min
3	70 A	40 V	1/8"	1/16"	7	20° C	10	4,5 pulg/min
4	70 A	30 V	2/32"	1/16"	4	20° C	10	3,5 pulg/min
5	67 A	14 V	2/32"	1/16"	4	20° C	10	3,5 pulg/min
6	65 A	13 V	2/32"	1/16"	4	20° C	10	3,5 pulg/min
7	64 A	13 V	2/32"	1/16"	4	20° C	10	3,2 pulg/min
8	50 A	11 V	2/32"	1/16"	4	100° C	10	3,2 pulg/min
9	52 A	10 V	2/32"	1/16"	4	100° C	10	3,3 pulg/min
10	60 A	13 V	2/32"	1/16"	4	100° C	10	3,3 pulg/min
11	60 A	13 V	2/32"	1/16"	4	20° C	10	3,2 pulg/min
12	59 A	13 V	2/32"	1/16"	4	20° C	10	3,1 pulg/min
13	57 A	12 V	2/32"	1/16"	4	20° C	8	3,1 pulg/min
14	59 A	13 V	2/32"	1/16"	4	20° C	8	3,1 pulg/min

PPS: Pulsaciones Por Segundo
Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

Tabla 4. (Continuación)

Prueba	Amperaje	Voltaje	Diámetro Electrodo	Diámetro Aporte	Número de Tobera	Temperatura precalentamiento	PPS	Velocidad
15	60 A	13 V	2/32"	1/16"	4	20° C	8	3 pulg/min
16	59 A	13 V	2/32"	1/16"	4	20° C	8	2,8 pulg/min
17	58 A	14 V	2/32"	1/16"	4	20° C	8	2,7 pulg/min
18	60 A	14 V	2/32"	1/16"	4	20° C	8	2,7 pulg/min
19	60 A	14 V	2/32"	1/16"	4	20° C	8	2,7 pulg/min
20	60 A	14 V	2/32"	1/16"	4	20° C	8	2,7 pulg/min

PPS: Pulsaciones Por Segundo
Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

Las probetas 1 a 12 fueron desechadas a causa de diferentes discontinuidades que se presentaron a lo largo de su superficie. Algunas de estas se descartaron por excesos de temperatura que fundieron una gran parte de la superficie donde se aplicó la soldadura, otras presentaron faltas de fusión y porosidades, todas estas causas se encuentran descritas en las observaciones de los registros del procedimiento para calificación (PQR) contenidos en el anexo B.

Se realizó el mecanizado de las probetas 13 a 20, estas fueron soldadas con los parámetros mencionados en la Tabla 4. Debido a que en ellas no se encontró ningún poro o desperfecto en la superficie donde fue aplicada la soldadura. Luego de este mecanizado se descartaron las probetas 13 y 14, ya que durante este, salieron a la superficie algunos poros de la soldadura.

9.3 GENERACIÓN DE LA ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA WPS.

Las variables o parámetros que se incluyeron en el WPS de este documento, se ordenaron según la Tabla QW-256 de la sección XI del Código ASME las cuales se muestran en la Tablas 8. En esta misma se expresa si aplica o no para la especificación del procedimiento de soldadura que se generó como resultado de este proyecto.

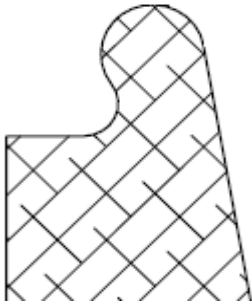
Tabla 5. Variables de la especificación del procedimiento de soldadura.

PARAMETROS		CONDICIÓN
Diseño de Junta.	Diseño de la Ranura	No Aplica
	Soldadura de Respaldo	No Aplica
	Apertura de Raíz	No Aplica
	Retenedores	No Aplica
Material Base	Denominación	AA 6061-T6
	Límites de espesor	No Aplica
	Calificación del espesor	No Aplica
	P-No.	23
Metal de Aporte	Tamaño	1/16"
	F-No.	23
	A-No.	No Aplica
	Aporte	ER 4043
	Inserto Consumible	No Aplica
	Forma del metal de aporte	Varilla
	Diámetro	1/16"
	Clasificación	AWS
	Fundente	No Aplica
Posiciones	Posición	Plana
	Soldadura Vertical	No Aplica
Precalentamiento	Superior a 55 ° C	No Aplica
	Inferior a 55° C	Aplica
Tratamiento Térmico Pos Soldadura	Tratamiento Térmico	No Aplica
	Tratamiento Térmico con T&T	No Aplica
	Límites de Espesor	No Aplica
Gas	Prueba o Compensación	No Aplica
	Individual, Mezclado o en %	Argón
	Velocidad de Flujo	8 L/min
	Flujo de Respaldo	No Aplica
Características Eléctricas	Calor de Entrada	No Aplica
	Corriente pulsada	Aplica
	Corriente o Polaridad	Alterna - Electrodo Positivo
	Rangos de Corriente y Voltaje	Aplica
	Electrodo de Tungsteno	Aplica
Técnica	Manual o Automático	Manual

Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

Por último el formato utilizado según la recomendación del Apéndice B de la Sección IX del código ASME se muestra en la figura 8.

Figura 12. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS).

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA					
Empresa	Metalmecánica Santa Bárbara Ltda.	Generado Por	Ivan Chavez Leon		
WPS No.	001	Fecha	24/09/2014	Soportado en los PQR	15-20
Revisión No.	001	Fecha	24/09/2014		
Proceso de Soldadura	GTAW	Tipo	Manual		
<p>Imagen Zona de Reparación</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">Metal Base</p>					
Denominación	AA 6061-T6	P-No.	23	Grupo No.	23.1
Metal de Aporte					
Clasificación	AWS	Denominación	ER 4043	F-No.	23
Forma del Metal de Aporte	Varilla	Diametro	1/16"	Longitud	400mm
Gas de Protección					
Tipo de Gas	Argón	Velocidad de Flujo	8 - 10 L/min		
Características Eléctricas					
Tipo de Corriente	Alterna	Tipo de Onda	Cuadrada	Polaridad	Electrodo Positivo
Rango de Amperaje	58A - 60A		Rango de Voltaje	13V - 14V	
Pulsaciones Por Segundo	8	Electrodo	Tungsteno	Diámetro	3/32"
Tipo de Electrodo	Punto Verde	Temperatura de Pre calentamiento	20 C		
Velocidad de Avance	2,7 pulg/min - 3pulg/min				
Técnica					
Posición	Plana	Espesor de Cordón	3mm		

Fuente: Autor del Proyecto. 2014.

Para finalizar, el día 7 de Octubre de 2104, se realizó un procedimiento de reparación directamente en uno de los moldes de termoformado del producto Sello Plus, aplicando exitosamente el WPS que resultó de este proyecto, el molde se entregó a la empresa Ajoever S.A. el día 9 de Octubre de 2014, para que reiniciara su servicio y hasta el día 4 de Noviembre, que se terminó de redactar este proyecto no se han presentado fallas ni anomalías en la zona reparada del molde.

CONCLUSIONES

- Al comparar los resultados del ensayo de espectrometría de emisión óptica con los datos presentados en la norma del aluminio, se dedujo que la aleación en la que están fabricados los moldes de termoformado del producto Sello Plus, es una aleación de aluminio AA 6061-T6.
- Según la recomendación del Código ASME en su sección IX, y también consultando en el mercado nacional, el único material de aporte que es de fácil adquisición, es el AWS ER 4043, los otros que se recomiendan por ASME, no se comercializan en el mercado nacional, para poder obtenerlos las únicas opciones son fabricarlos a pedido o importarlo desde otros países.
- Cuando se trabaja con un equipo de soldadura para proceso GTAW que tenga la opción de corriente alterna de alta frecuencia, se recomienda hacer la conexión de polo a tierra del equipo y de los demás equipos eléctricos a su alrededor, ya que la interferencia de campos magnéticos afecta el correcto funcionamiento del equipo de soldadura, puntualmente cuando se varía frecuencia o balance de la fuente.
- El proceso de soldadura GTAW es el más conveniente a la hora de aplicar soldaduras en aluminio, puesto que favorece la soldabilidad de este tipo de metal. La aplicación del metal de aporte AWS ER 4043 al aluminio AA 6061-T6 produce soldaduras homogéneas en la superficie y que a la hora de mecanizar y pulir no presenta discontinuidades que puedan afectar el trabajo normal del el molde en producción.

BIBLIOGRAFIA

BALASUBRAMANIAN V., RAVISANKAR V. y MADHUSUDHAN G. Effect of post weld aging treatment on fatigue behavior of pulsed current welded AA7075 aluminum alloy joints. New York. Springer. 2006.

HERNANDEZ RIESCO, German. Manual del Soldador, 17ª Edición. Madrid. Editorial CESOL. 2002. 634 p.

HERNANDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNANDEZ COLLADO, Carlos; BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. Metodología de la Investigación, 5ª Edición. México D.F. Editorial McGraw-Hill. 2010. 614 p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. 2010 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, IX Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazzers, and welding and brazing Operators. New York. ASME, 2011. 362 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Sexta actualización. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008. 36 p.: il. (NTC 1486)

LI, Leijun, ORME, Kevin y YU, Wenbin. Effect of joint design on mechanical properties of AL7075 weldment. New York. Springer, 2005.

MATHERS, Gene. Welding of aluminium and its alloys. Abington Hall. Woodhead Publishing Limited. 2002.

RAO, K. Srinivasa y RAO, K. Prasad. Fusion zone of AA6061 alloy GTA welds: electrochemical stabilisation and impedance study. London. Institute of Materials, Minerals and Mining. 2005

ANEXO A. Resultados De Laboratorio Universidad Nacional De Colombia.

ANEXO B. PQR de las pruebas de soldadura.

ANEXO C. Certificado de calidad aluminio para pruebas de soldadura.

ANEXO D. Norma del aluminio para composición química.